

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Masalah transportasi telah lama diakui sebagai salah satu pilar fundamental dalam disiplin ilmu manajemen rantai pasok dan riset operasi. Secara matematis, permasalahan ini berfokus pada penentuan alokasi optimal sejumlah komoditas dari berbagai sumber menuju beberapa tujuan dengan mempertimbangkan batasan kapasitas dan permintaan. Formulasi awal model transportasi klasik yang diperkenalkan oleh Hitchcock (1941) dan kemudian disempurnakan oleh Koopmans (1949) merevolusi cara organisasi merencanakan distribusi barang. Model ini secara tradisional diformulasikan sebagai masalah optimasi tujuan tunggal dengan satu-satunya kriteria utama, yaitu meminimalkan total biaya distribusi yang mencakup ongkos angkut, penanganan, dan administrasi [1]. Selama beberapa dekade, pendekatan deterministik ini berhasil menjadi standar baku dalam perencanaan logistik, terutama pada lingkungan bisnis yang relatif stabil dan terprediksi.

Namun, transformasi struktural dalam ekosistem logistik global telah menggeser paradigma pengambilan keputusan secara signifikan. Dinamika pasar yang semakin kompetitif, tuntutan konsumen terhadap kecepatan layanan, serta kesadaran akan efisiensi operasional memaksa perusahaan untuk tidak lagi berorientasi pada biaya semata. Dalam praktiknya, manajer logistik dihadapkan pada kebutuhan untuk mengoptimalkan beberapa tujuan secara simultan, yang pada kenyataannya sering kali bersifat saling bertentangan. Empat dimensi kritis yang perlu dipertimbangkan secara terintegrasi dalam konteks ini meliputi minimisasi biaya distribusi, waktu tempuh dan jarak tempuh. Ketidakmampuan untuk mencapai nilai optimal pada keempat fungsi tujuan secara bersamaan menuntut adanya pendekatan kompromi yang mampu menghasilkan solusi seimbang dan berkelanjutan.

Konsep pencarian titik temu di antara berbagai tujuan yang saling bertentangan dalam optimasi logistik pada dasarnya mencerminkan upaya mencapai proporsionalitas dan keadilan dalam pengambilan keputusan. Secara filosofis, pendekatan ini sejalan dengan prinsip moderasi yang menekankan pentingnya menghindari sikap ekstrem, baik yang cenderung mengorbankan aspek efisiensi waktu dan bahan bakar demi biaya semata, maupun yang terlalu konservatif sehingga menimbulkan inefisiensi operasional secara keseluruhan. Prinsip keseimbangan semacam ini tidak hanya berfungsi sebagai

panduan etis, tetapi juga memberikan landasan teoretis yang kuat bagi pengembangan model transportasi yang mampu menampung *trade-off* antar kriteria secara harmonis dan bertanggung jawab. Nilai-nilai keseimbangan ini tercermin dalam Q.S Al-Furqan ayat 67:

وَالَّذِينَ إِذَا أَنْفَقُوا لَمْ يُسْرِفُوا وَلَمْ يَقْتُرُوا وَكَانَ بَيْنَ ذَلِكَ قَوَامًا

Artinya: "Dan, orang-orang yang apabila berinfak tidak berlebihan dan tidak (pula) kikir. (Infak mereka) adalah pertengahan antara keduanya."

Di balik kompleksitas multi-objektif tersebut, terdapat tantangan mendasar yang sering kali diabaikan dalam model konvensional, yaitu tingginya tingkat ketidakpastian dan kekaburan data operasional di lapangan. Parameter-parameter kunci seperti biaya transportasi, waktu tempuh, dan jarak rute. Variabilitas ini bersumber dari faktor-faktor eksternal maupun internal yang sulit dikendalikan, seperti fluktuasi kemacetan lalu lintas, perubahan kondisi cuaca, degradasi performa armada, perbedaan gaya mengemudi, serta ketidaktepatan estimasi permintaan. Ketika ketidakpastian ini dipaksakan untuk direpresentasikan dalam nilai tegas, model yang dihasilkan cenderung bersifat rapuh dan solusi yang tampak optimal pada kertas sering kali gagal saat diimplementasikan. Oleh karena itu, pendekatan deterministik konvensional dinilai tidak lagi memadai untuk merepresentasikan realitas logistik yang dinamis dan tidak lengkap informasinya [2].

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, teori himpunan *fuzzy* yang diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965 menawarkan kerangka matematis yang lebih realistis dalam memodelkan ketidakpastian. Berbeda dengan teori probabilitas yang berfokus pada frekuensi kejadian acak, logika *fuzzy* mengakomodasi derajat keanggotaan yang memungkinkan suatu nilai berada dalam rentang antara benar dan salah. Penelitian terdahulu oleh Varalakshmi dan Srinivasan telah mengimplementasikan pendekatan ini melalui penggunaan bilangan *fuzzy* segilima untuk menangani ketidakpastian pada masalah transportasi [3]. Nilai *fuzzy* tersebut kemudian dikonversi menjadi nilai tegas menggunakan metode *Pascals Graded Mean*. Meskipun studi tersebut memberikan kontribusi berharga, pendekatannya masih terbatas pada formulasi tujuan tunggal dan menggunakan struktur bilangan yang melibatkan tiga parameter, sehingga meningkatkan beban komputasi secara signifikan serta menyulitkan interpretasi praktis dalam sistem pendukung keputusan modern.

Menyadari celah metodologis tersebut, penelitian ini mengembangkan kerangka penyelesaian masalah transportasi yang mengintegrasikan multi-objektif dengan representasi ketidakpastian yang lebih efisien dan aplikatif. Bilangan *fuzzy* segitiga dipilih sebagai instrumen representasi utama karena menawarkan keseimbangan optimal antara kesederhanaan matematis dan kemampuan merepresentasikan ketidakpastian. Dengan tiga parameter inti yang mencakup batas bawah sebagai skenario optimis, nilai tengah sebagai skenario paling mungkin, dan batas atas sebagai skenario pesimis, bilangan segitiga cukup

robust untuk menangkap variabilitas data tanpa mengorbankan efisiensi komputasi[4]. Pemilihan bentuk ini juga sejalan dengan kebutuhan praktis di mana data operasional logistik lebih mudah diklasifikasikan ke dalam tiga tingkat keyakinan, sehingga mempermudah proses pengumpulan data dan validasi model oleh para praktisi lapangan.

Lebih lanjut, proses *defuzzifikasi* atau konversi nilai *fuzzy* menjadi nilai tegas dalam penelitian ini menggunakan pendekatan rata-rata harmonik. Pemilihan metode ini didasarkan pada pertimbangan matematis dan operasional yang mendalam, mengingat rata-rata harmonik secara inheren memberikan bobot lebih besar terhadap nilai yang lebih kecil sehingga menghasilkan estimasi yang lebih konservatif dan berorientasi pada mitigasi risiko. Karakteristik ini sangat relevan dalam perencanaan logistik, di mana kegagalan akibat estimasi yang terlalu optimis jauh lebih berdampak buruk daripada penghematan marginal dari estimasi yang agresif. Dibandingkan dengan rata-rata aritmetika yang rentan terhadap distorsi nilai ekstrem tinggi, atau rata-rata geometrik yang kurang sensitif terhadap batas bawah, rata-rata harmonik menawarkan pendekatan yang lebih *prudent* dan selaras dengan prinsip kehati-hatian dalam manajemen rantai pasok modern[5].

Selain menyusun algoritma alokasi manual, aspek krusial yang harus dipenuhi dalam sebuah penelitian matematika adalah pengujian keandalan ilmiah. Oleh karena itu, guna membuktikan tingkat keoptimalan solusi yang dihasilkan oleh prosedur alokasi manual, penelitian ini mengintegrasikan prosedur uji validasi eksternal berbasis komputasi numerik eksak. Model transportasi yang telah diringkas menggunakan bobot rata-rata harmonik diformulasikan kembali ke dalam pemrograman linier tegas untuk diselesaikan secara simultan menggunakan bantuan *scipy.optimize.linprog* dengan *HiGHS Solver*[6]. Hasil alokasi manual kemudian diukur tingkat penyimpangan atau *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) terhadap solusi optimal mutlak komputer tersebut pada berbagai skala dimensi matriks uji, dari skala kecil hingga skala besar industri nyata[7].

Integrasi antara kerangka multi-objektif, representasi ketidakpastian berbasis bilangan *fuzzy* segitiga, serta mekanisme *defuzzifikasi* yang *risk-aware* melalui rata-rata harmonik diharapkan dapat menjembatani kesenjangan antara teori optimasi klasik dan kebutuhan praktis logistik kontemporer. Model yang dikembangkan tidak hanya bertujuan untuk menghasilkan solusi matematis yang *feasible*, tetapi juga solusi yang *robust*, seimbang, dan dapat diimplementasikan dalam lingkungan bisnis yang penuh ketidakpastian. Pendekatan ini secara simultan menghormati prinsip keseimbangan dengan menghindari solusi ekstrem, mengakomodasi realitas data yang kabur, dan menyediakan mekanisme kompromi yang transparan antar tujuan yang saling bertentangan. Oleh karena itu, berdasarkan urgensi teoretis, relevansi praktis, dan kebutuhan akan metodologi yang lebih adaptif terhadap ketidakpastian operasional, penulis merumuskan penelitian ini dengan judul **Penyelesaian Masalah Transportasi *Fuzzy* Multi-Objektif Menggunakan Bilangan *Fuzzy* Segitiga dengan Pendekatan Rata-Rata Harmonik.**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan diatas, maka dapat dijabarkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merumuskan model masalah transportasi multi-objektif yang mampu mengakomodasi ketidakpastian dan fluktuasi parameter operasional menggunakan bilangan fuzzy segitiga ?
2. Bagaimana tingkat akurasi dan kelayakan alokasi metode penyelesaian masalah transportasi fuzzy multi-objektif dengan pendekatan rata-rata harmonik ketika diuji pada berbagai variasi skala matriks baik dalam kondisi seimbang maupun tidak seimbang ?

1.3 Batasan Masalah

1. Data yang digunakan merupakan data simulasi masalah transportasi seimbang dan tidak seimbang dengan variasi ukuran matriks 10x10, 20x30, 50x50, 60x70 dan 100x100.
2. Ketidakpastian data operasional yang mencakup biaya distribusi, waktu tempuh, jarak tempuh, persediaan dan permintaan dimodelkan menggunakan bilangan *fuzzy* segitiga.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Merumuskan model matematis masalah transportasi multi-objektif yang mampu mengakomodasi ketidakpastian dan fluktuasi parameter operasional dengan menggunakan pendekatan bilangan fuzzy segitiga.
2. Menganalisis tingkat akurasi dan kelayakan alokasi metode penyelesaian masalah transportasi fuzzy multi-objektif dengan pendekatan rata-rata harmonik melalui pengujian pada berbagai variasi skala matriks, baik dalam kondisi seimbang maupun tidak seimbang.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi pengerjaan penelitian ini dilakukan secara sistematis melalui tahapan-tahapan ilmiah sebagai berikut:

1. **Studi Literatur:** Mengumpulkan, mengkaji, dan mendalami referensi ilmiah terkait teori himpunan *fuzzy*, masalah transportasi multi-objektif, karakteristik bilangan *fuzzy* segitiga, serta operator rata-rata harmonik dari jurnal dan buku teks ilmiah terpercaya.
2. **Formulasi Model Matematis:** Membangun draf fungsi tujuan multi-objektif untuk empat kriteria (biaya, waktu dan jarak) beserta fungsi kendala ketersediaan (*supply*) dan permintaan (*demand*) dalam parameter bilangan *fuzzy* segitiga.
3. **Pengembangan Algoritma Penyelesaian:** Menyusun runtunan langkah sistematis untuk mereduksi level matriks *fuzzy* ke dalam bentuk tegas (*crisp*) melalui perhitungan pembobotan rata-rata harmonik, disusun dengan prosedur alokasi manual berdasarkan nilai fuzzy terkecil hingga seluruh kebutuhan pasokan terpenuhi.
4. **Simulasi Komputasi dan Uji Validasi:** Mengimplementasikan model pemrograman linier tegas ke dalam bahasa Python via pustaka `scipy.optimize.linprog` dengan *HiGHS Solver*. Hasil alokasi manual pada berbagai ukuran matriks (10×10 hingga 100×100) serta skenario *stress testing* diuji kedekatan solusinya terhadap nilai optimal mutlak komputer menggunakan perhitungan persentase error MAPE.
5. **Analisis dan Penarikan Kesimpulan:** Menganalisis sifat konvergensi, skalabilitas, serta batasan mekanis algoritma usulan berdasarkan persentase error yang didapatkan untuk merangkum hasil penelitian.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika pengorganisasian laporan skripsi ini disusun menjadi beberapa bab utama sebagai berikut:

BAB I: PENDAHULUAN

Berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian, serta sistematika penulisan laporan skripsi.

BAB II: LANDASAN TEORI

Memaparkan teori-teori dasar pendukung penelitian meliputi program linier, model transportasi klasik, teori himpunan *fuzzy*, bilangan *fuzzy* segitiga, konsep multi-objektif, rata-rata harmonik, fungsi ranking defuzzifikasi, serta teori komputasi optimasi eksternal.

BAB III: PENYELESAIAN MASALAH TRANSPORTASI FUZZY MULTI-OBJEKTIF MENGGUNAKAN BILANGAN FUZZY SEGITIGA DENGAN PENDEKATAN RATA-RATA HARMONIK

Menjelaskan secara terperinci formulasi model transportasi *fuzzy* multi-objektif yang dirancang, penjabaran langkah-langkah algoritma alokasi manual berdasarkan nilai fuzzy terkecil, diagram alir (*flowchart*) sistem, serta draf prosedur uji validasi performa menggunakan SciPy Linprog.

BAB IV: STUDI KASUS DAN ANALISA

Menyajikan hasil perhitungan numerik dari penerapan alokasi manual pada beberapa variasi skala matriks uji serta analisis mendalam mengenai hasil akurasi dari metode yang digunakan.

BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN

Memuat kesimpulan akhir yang menjawab seluruh rumusan masalah penelitian berdasarkan hasil analisis bab sebelumnya, disertai saran-saran akademis untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

